

Балака Е.В., Харьков, Украина

## **ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ ВЛИЯНИЯ НА ПРОЦЕСС ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ ТЕХНОЛОГИЙ ПОСЛОЙНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ (RAPID PROTOTYPING)**

*У роботі розглянуті технології пошарового нарощування, встановлений вплив основних технологічних чинників на процес формоутворення. Проаналізований вплив на якість деталей конструктивних характеристик, параметрів устаткування, матеріалу, процесу, фінішної обробки і довкілля. Підтверджена необхідність обґрунтування вибору процесу виготовлення, моделі устаткування і виду матеріалу.*

*В работе рассмотрены технологии послойного выращивания, установлено влияние основных технологических факторов на процесс формообразования. Проанализировано влияние на качество детали конструктивных характеристик, параметров оборудования, материала, процесса, доводочной обработки и окружающей среды. Подтверждена необходимость обоснования выбора процесса изготовления, модели оборудования и вида материала.*

*E.V. BALAKA*

*MAJOR FACTORS OF INFLUENCE ON FORMING PROCESS OF DETAILS BY RAPID PROTOTYPING (RP) TECHNOLOGIES*

*In this paper the technology of rapid prototyping, set the main effect of technological factors on the process of formation. The influence on the quality of the details of design characteristics, parameters, equipment, material, process, finishing process and the environment. Confirmed the need to justify the selection of the manufacturing process, equipment model and type of material.*

В настоящее время интегрированные генеративные технологии, базирующие изготовление изделий не на отделении объемов, составляющих припуск, а на послойном наращивании объектов до достижения требуемой формы, находят все большее применение в различных отраслях производства: машиностроение, приборостроение, авиастроение, автомобилестроение, архитектура, медицина, археология и др.

Генеративные технологии представляют собой образец эффективного интегрирования последних достижений материаловедения, информационных, лазерных и других наукоемких технологий, а также теории управления, оптимизации технологических процессов и конструкций, современных технологий литья, прецизионной обработки [1].

Для широкого промышленного применения генеративных процессов производства изделий в современном машиностроении существуют определенные ограничения. Прежде всего, это отсутствие должной востребованности в отечественном производстве, вызванное современной экономической ситуацией. Во-вторых, определенные ограничения генеративных способов изготовления изделий с точки зрения применения различных материалов,

обладающих необходимыми физико-механическими свойствами. Для визуализации принципиальной формы, проверки возможности сборки и дизайнерской оценки степени точности генеративных методов достаточно при условии их постобработки. Однако для промышленных целей точность размеров и форм в пределах 0,01 – 0,1 мм недостаточна для изготовления точного инструмента, пресс-форм, литья по выплавляемым моделям и др. [2].

Технологические погрешности изготовления в процессах послойного наращивания в большинстве случаев связаны с усадкой и деформацией, возникающими в процессе полимеризации слоя из жидкой фазы. На формообразование изделий влияет целый ряд факторов, которые обобщенно можно разделить на конструкционные характеристики детали, параметры оборудования, свойства материала, параметры процесса, доводочные процессы и свойства окружающей среды.

Поэтому вопросы повышения качества изготовления деталей с использованием методов RP за счет повышения размерной точности являются актуальными и требующими решения на этапе подготовки производства.

*Цель работы:* установление влияния основных технологических факторов на процесс формообразования изделий, изготовленных с помощью технологий послойного выращивания (Rapid Prototyping – RP).

Схематически наиболее значимые факторы, влияющие на качество детали, представлены на рисунке [3]. Для повышения эффективности технологии послойного наращивания необходимо детализировать процессы, происходящие во время стереолитографии (послойного отверждения слоев материала), для построения детали определенной геометрической формы.

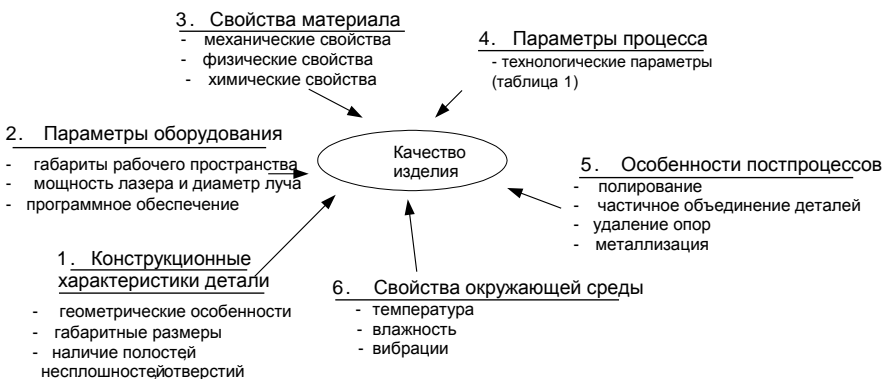


Рисунок – Основные факторы влияния на качество деталей, изготовленных по RP-технологиям

Качество полученного изделия зависит от многих факторов производственного процесса. Анализ их влияния позволит выбирать и корректировать условия и режимы размерного формообразования и постобработки.

Шероховатость поверхности изготовленной детали имеет равномерный характер со сравнительно небольшим разбросом высот неровностей. Вершины неровностей имеют округлую форму с достаточно большим радиусом округления. Шероховатость боковых поверхностей в основном зависит от шага наращивания и находится в пределах  $Ra=6-13$  мкм ( $Rz=38-72$  мкм). Шероховатость в направлении, перпендикулярном вектору наращивания генерируемых слоев, не превышает  $Ra=3,52$  мкм [4].

Прямое получение деталей методами RP обеспечивает качество поверхности по критерию  $Ra$  ( $Rz$ ), приближающиеся к возможностям фрезерования и даже шлифования. Исходное состояние поверхности детали  $Ra=3,97$  мкм ( $Rz=21,03$  мкм) после доводки улучшается до  $Ra=0,64$  мкм ( $Rz=4,19$  мкм) [1].

#### 1. Конструктивные характеристики детали

Обеспечение требуемого качества поверхности детали в значительной мере зависит от выбора ориентации детали в рабочем пространстве и расположения технологических опор. Использование принципа структурной декомпозиции и трансформации изделий позволяет изготавливать детали, габаритные размеры которых превышают размеры рабочей камеры, а также изготавливать изделия со значительным сокращением технологического времени построения, что снижает себестоимость изготовления. Последующее соединение отдельных элементов производится склеиванием по поверхностям технологических разъемов, для обеспечения точности базирования создают дополнительные базирющие элементы [4].

Наличие полостей и прочих конструкционных особенностей также влияет на качественные характеристики конечного продукта. Недопустимо «нависание» элементов над жидкой фазой, что приводит к необходимости построения технологических опор.

#### 2. Параметры оборудования

Наиболее значимыми для технологического процесса послойного наращивания являются следующие показатели: качество и стабильность источника излучения, система наведения луча и точность функционирования привода платформы. На качество полимеризации также значительное влияние оказывает качество функционирования акустико-оптического модулятора, качество калибровки, используемое программное обеспечение, а также динамические свойства системы управления лазерным лучом [3].

Неравномерное движение платформы и погрешности при перемещении по оси  $z$  приводят к неравномерностям по толщине слоя и перекосам распо-

ложения отдельных слоев полимера. Стоит отметить, что точность по оси z выше соответствующей точности в направлениях x и y.

Таблица 1 – Основные характеристики лазерной стереолитографической установки [4]

№ пп	Наименование	Значения параметров		
		<i>min</i>	<i>баз.</i>	<i>max</i>
1	диаметр пятна лазерного луча, мм	0,230	0,255	0,280
2	скорость луча лазера, мм/с	3000	4000	5000
3*	толщина фотополимеризуемого слоя, мм	0,025	0,1	0,2
4	коэффициент проходов луча при построении детали	3	4	11
5	коэффициент проходов луча при построении опор	2	4	6
6*	длина подвода и перебега выравнивающего ножа, мм	5	10	15
7*	скорость движения выравнивающего ножа, мм/с	4	13	22
8*	коэффициент числа проходов выравнивающего ножа	1	2	3
9	скорость опускания рабочей платформы, мм/с	1	2	3
10*	базовое время выдержки, с	5	15	30
11	глубина погружения платформы при построении опор, мм	6,25	10	15
12*	время выдержки при построении опор, с	3	10	22

\* – параметры, регулируемые технологом

На примере процесса стереолитографии видно, что базовые параметры луча, выравнивающего ножа, рабочей платформы и построения опор возможно менять в определенных пределах. При этом технолог задает значение параметра с учетом конкретных условий изготовления детали, таким образом либо повышая качество детали, либо уменьшая время ее построения.

Несмотря на то, что технолог может задавать различные параметры процесса, необходимо учитывать весьма узкий диапазон таких изменений. Основные же характеристики установки остаются неизменными, значительно ограничена возможность управления процессом за счет изменения входных параметров, а также автоматическое разбиение трехмерной модели на слои и

элементы, и невозможность регулирования этого процесса технологом. Эти факторы позволяют характеризовать подобные технологии наращивания как устойчивые.

### 3. Свойства материала

Полимеризация ведет к увеличению плотности материала и тем самым к уменьшению объема детали. Поэтому необходимо несколько увеличить деталь, чтобы компенсировать усадку, происходящую после отверждения. Степень увеличения учитывается через коэффициент усадки, который задается пользователем. Определить коэффициент усадки сложно, это требует тщательных вычислений и экспериментальной проверки.

Характеристики материалов для каждого вида технологии могут колебаться в значительных пределах (таблицы 2, 3, 4) [2, 5]. Так, детали полученные способом стереолитографии, имеют сравнительно небольшую твердость и температурную стойкость, в тоже время обладая прозрачностью и упругостью. А детали, полученные способом селективного лазерного спекания, имеют высокую твердость и теплостойкость, но хрупки.

Таблица 2 – Основные свойства смолы SL 5530 после отверждения, применяемой в технологии SLA [5]

Характеристика	Ед. измер.	Значение после 90 минутного облучения УФ	Значение после 90 минутного облучения УФ + 2 часа 160°C
Твердость по Шору		88	90
Модуль упругости	МПа	2,260÷3,24	3,50÷3,63
Прочность на изгиб	МПа	63÷87	96÷108
Предел прочности на разрыв	МПа	57÷61	47÷61
Относительное удлинение при разрыве	%	3,8÷4,4	1,3÷2,9
Температура стеклования	°C	79	122
Теплопроводность	В/м °К	0,173	–
Плотность	г/см <sup>3</sup>	1,25	–

Свойства материала для построения моделей изменяются при воздействии различных факторов: температуры и светового излучения (табл. 2). Эти изменения необходимо учитывать при изготовлении и эксплуатации деталей.

Таблица 3 – Основные свойства порошков DuraForm, применяемых в технологии SLS [2]

Общие свойства	Ед. измер.	DuraForm полиамид	DuraForm со стекло-наполнителем
Плотность, 20°C	%	0,97	1,4
Влагопоглощение, 23°C	%	0,41	0,30
Насыпной объемный вес	г/см <sup>3</sup>	0,59	0,84
Средняя крупность частиц	мкм	58	48
Степень дисперсности, 90%	мкм	25÷92	10÷96
<i>Термические свойства</i>			
Температура плавления	°C	184	185
<i>Механические свойства</i>			
Предел прочности на разрыв	МПа	44	38,1
Модуль упругости	МПа	1600	5910
Относительное удлинение при разрыве	%	9	2
<i>Ударная вязкость</i>			
Разрушающий контроль	Дж/м	214	96
Неразрушающий контроль	Дж/м	428	101

Таблица 4 – Основные свойства металлического порошка LaserForm A6 Steel Material, применяемого в технологии SLS [5]

Общие свойства	Ед. измер.	Показатель
Плотность	г/см <sup>3</sup>	7,8
Предел текучести при растяжении	МПа	470
Предел прочности на разрыв	МПа	610
Относительное удлинение	%	2,0÷4,0
Модуль упругости	ГПа	138
Предел текучести при сжатии	МПа	480
Твердость по Роквеллу (полирование)	НРС	10-20
Твердость по Роквеллу (после термообработки)	НРС	39
Теплопроводность	В/м °К	215
Коэффициент теплового расширения	мкм/°C	7,45

#### 4. Параметры процесса.

При сканировании в одном направлении действие внутренних сил сжатия в основном совпадает с вектором сканирования и приводит к одностороннему закручиванию детали. Изменение направления сканирования способствует появлению более однородной структуры остаточных напряжений в детали и повышает степень стабильности детали. Также степень искажения снижается в случае наличия опорной конструкции. Действенным методом снижения интенсивности сил сжатия является двойное облучение каждого полимеризуемого слоя. Во время первого облучения слоя он не должен находиться в состоянии непосредственного касания с нижележащим слоем для возможности беспрепятственного сжатия. Второе облучение выполняет функцию собственно фиксации слоя. Поэтому в данном случае следует особо тщательно задавать параметры толщины слоя, а именно стремиться к минимально возможному контакту с нижележащим слоем при определенной энергетической плотности процесса, обеспечивающей достаточную степень сжатия [3].

Проведение тестовых испытаний в значительной мере позволяет предвидеть степень усадки материала после полимеризации и дополнительного отверждения в зависимости от линейных параметров будущего изделия.

Точно так же как центр режущего инструмента должен быть смещен на величину его радиуса от границы детали при обработке на станке с ЧПУ, лазер в стереолитографии должен быть смещен на половину ширины линии внутрь детали для получения правильного положения границ. Оптимальное значение поправки для компенсации ширины линии определяется обычно путем тестирования на пробной детали.

При производстве методом стереолитографии необходимо подобрать оптимальные параметры отклонений размеров и формы деталей. При высокой степени полимеризации в процессе отверждения увеличивается степень сжатия и повышается степень долговременной стабильности линейных размеров детали. Следует также учитывать точность размеров и формы детали, качество поверхности, ее долговременную стабильность, необходимость доводки и общее время изготовления детали, что непосредственно влияет на экономическое обоснование применения генеративных технологий.

#### 5. Параметры постобработки.

После выращивания стереолитографическую модель и платформу помещают в моечную камеру с растворителем. Проводят очищение от смолы и промывку специальным раствором, сушку. После снятия модели с платформы она помещается в специальную камеру для окончательного отверждения. Оптимальное однородное отверждение по объему обеспечивает минимизацию влияния полимеризации на точность созданного объекта [4].

В зависимости от решаемой задачи, для визуализации и концептуальной оценки удаляются опоры, для снижения шероховатости поверхностей выполняется полирование.

#### 6. Свойства окружающей среды.

Среди погрешностей следует учитывать запыленность рабочей камеры станочки, вибрацию, влажность, температуру, которые вызывают отрицательные изменения всей производственной системы [3]. Как правило, требования к техническим процессам исключают влияние свойств окружающей среды.

#### *Заклучение.*

Таким образом, возможность комплексного анализа факторов, обеспечивающих формообразование детали, полученной методами послойного наращивания, позволяет предложить ряд рекомендаций для эффективного использования RP-технологий. Корректировку процесса полимеризации возможно проводить как до (настройка оборудования – табл. 1) так и после (доводка) непосредственно отвердения.

В зависимости от функционального назначения и конструкционных особенностей будущего изделия необходимо обосновать выбор процесса изготовления, а также модели оборудования и вида материала. Наиболее значимым из этих факторов является процесс изготовления, в то время как оборудование имеет конкретные параметры и особенности, выдвигает четкие требования по выбору материала (часто это очень ограниченный выбор).

Каждая конкретная производственная задача требует тщательного анализа и обоснованного расчета оптимального выбора традиционной технологии или определенной разновидности генеративных технологий, или же их гармоничного сочетания.

**Список использованной литературы:** 1. Робочі процеси високих технологій в машинобудуванні: Навч. посібник / За редакцією А.І. Грабченка. – Харків, ХДПУ, 1999 р. – 436 с. – Рос. мовою. 2. Rapid Prototyping Casebook. Edited by J.A. McDonald, C.J. Ryall, D.I. Wimpenny. Professional Engineering Publishing, London, UK, 2001, 260 p. 3. Rexilius J., Jomier J., Spindler W, Link F, Konig M, and Peitgen HO. Combining a Visual Programming and Rapid Prototyping Platform with ITK. Proc. Workshop Bildverarbeitung für die Medizin (BVM), pp. 460-464, Springer, Heidelberg, March 2005. 4. Интегрированные технологии ускоренного прототипирования и изготовления. Монография./ Под редакцией д-ра техн. наук Л.Л. Товажнянского, д-ра техн. наук А.И. Грабченко. – Харьков: ОАО «Модель Вселенной», 2005. – 224 с. – Рус. яз. 5. <http://www.protocam.com/html/materials-sla.html>.

*Поступила в редколлегию 15.05.2011*

**Bibliography (transliterated):** 1. Robochi procesi visokih tehnologij v mashinobuduvanni: Navch. posibnik / Za redakcieju A.I. Grabchenka. – Harkiv, HDPU, 1999 r. – 436 s. – Ros. movoju. 2. Rapid Prototyping Casebook. Edited by J.A. McDonald, C.J. Ryall, D.I. Wimpenny. Professional Engineering Publishing, London, UK, 2001, 260 p. 3. Rexilius J., Jomier J., Spindler W., Link F., Konig M., and Peitgen HO. Combining a Visual Programming and Rapid Prototyping Platform with ITK. Proc. Workshop Bildverarbeitung für die Medizin (BVM), pp. 460-464, Springer, Heidelberg, March 2005. 4. Integrirovannye tehnologii uskorenno prototipirovaniya i izgotovleniya. Monografija./ Pod redakciej d-ra tehn. nauk L.L. Tovazhnjanskogo, d-ra tehn. nauk A.I. Grabchenko. – Har'kov: ОАО «Model' Vselennoj», 2005. – 224 s. – Rus. jaz. 5. <http://www.protocam.com/html/materials-sla.html>.